



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Übersetzung der
europäischen Patentschrift**

⑤① Int. Cl.⁷:
G 01 R 31/34

⑨⑦ **EP 0 552 991 B 1**

⑩ **DE 693 27 066 T 2**

- ②① Deutsches Aktenzeichen: 693 27 066.7
⑨⑤ Europäisches Aktenzeichen: 93 300 513.4
⑨⑤ Europäischer Anmeldetag: 25. 1. 1993
⑨⑦ Erstveröffentlichung durch das EPA: 28. 7. 1993
⑨⑦ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 24. 11. 1999
④⑦ Veröffentlichungstag im Patentblatt: 8. 6. 2000

DE 693 27 066 T 2

③⑩ Unionspriorität:

824392 23. 01. 1992 US

⑦③ Patentinhaber:

Ontario Hydro, Toronto, Ontario, CA

⑦④ Vertreter:

Dr. Weber, Dipl.-Phys. Seiffert, Dr. Lieke, 65189
Wiesbaden

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC,
NL, PT, SE

⑦② Erfinder:

Sedding, Howard G., Toronto, Ontario, M6S 1J9,
CA; Penman, James, Angus, DD10 8SP, GB; Lloyd,
Blake A., Ontario, L4W 2M9, CA

⑤④ Verfahren und Anordnung zum Feststellen von Statorfehlern in rotierenden dynamoelektrischen Maschinen

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 693 27 066 T 2

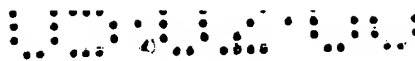
Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Erfassen und Lokalisieren von Statorfehlern in dynamoelektrischen Maschinen während des Betriebes derselben, sowie auf eine Vorrichtung zum Umsetzen dieses Verfahrens. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf die Erfassung und Lokalisierung einer kurzgeschlossenen Windung der Statorwicklung durch Überwachen des axialen Leckflusses.

Studien der Zuverlässigkeit und der Fehlermechanismen von dynamoelektrischen Maschinen mit Statorwicklungen mit mehreren Windungen zeigen, daß der Zusammenbruch der Statorisolation eine der Hauptursachen eines Ausfalls ist. Zusätzlich ist es nachgewiesen, daß der überwiegende Teil der Statorwicklungsfehler in solchen Maschinen von einem Durchbruch bzw. Zusammenbruch der Wicklungsisolation herrührt. In einigen Fällen, in welchen aufgrund des Fehlers nur eine minimale oder keine Kernbeschädigung auftrat, war es möglich, die beschädigte Spule von dem übrigen Teil der Wicklung zu isolieren und die Maschine erneut zu starten. Ein solcher Vorgang kann die Isolierung anderer Spulen bzw. Wicklungen notwendig machen, um einen gleichmäßigen Betrieb der Maschine aufrecht zu erhalten. Auf diese Weise kann die Maschine schnell wieder in Betrieb genommen werden, wenn auch mit verschlechterter Leistungsfähigkeit, bis eine vollständigere Reparatur oder ein Wicklungsaustausch geplant werden kann. Unglücklicherweise ist die Lokalisierung der fehlerhaften Spule schwierig und zeitraubend.

In IEEE Proc. B. El. Power Appl., Vol. 133, Nr. 3, Seiten 142 bis 148 wird ein Verfahren zur Überwachung elektrischer Antriebe offenbart, um das Auftreten von Fehlern vorab festzustellen und um eine frühe Anzeige bezüglich des Eintritts möglicher Fehler zu geben. Fehlerkennzeichnungen werden verwendet, um die Art und Weise des Fehlers zu identifizieren, welcher auftreten kann und um eine frühe Anzeige des Eintretens einer möglichen Fehlfunktion zu geben. Insbesondere wird eine mögliche Fehlfunktion erfaßt durch Messen der harmonischen Komponenten in dem axialen Leckfluß und durch Vergleichen der gemessenen Harmonischen mit bekannten Fehlerkennzeichen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zum Erfassen des Auftretens einer kurzgeschlossenen Wicklung sowie zur Anzeige seiner Position in der Statorwicklung der Maschine bereitzustellen, während die Maschine weiterhin läuft.

Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Erfassen und Lokalisieren von Statorfehlern in einer dynamoelektrischen Maschine mit einem Rotor und einem



Stator mit Statorspulen mit mehreren Windungen bereitgestellt durch Überwachen von Veränderungen in dem axialen Leckfluß während des Betriebes der Maschine, mit den Merkmalen:

Identifizieren der Frequenzen ausgewählter harmonischer Komponenten des axialen Leckflusses, die durch das Auftreten eines Statorfehlers in signifikanter Weise beeinflusst werden sollten,

Erfassen des axialen Leckflusses an jeder von zumindest vier Positionen, einschließlich einer Ausgangsposition, die symmetrisch um die Achse des Rotors an der Endwicklung des Stators verteilt sind,

Ableiten eines ersten Signales mit einem Wert, welcher der Größe des erfaßten Flusses entspricht, aus dem erfaßten Fluß an jeder der Positionen,

Speichern der Werte der ersten Signale, die vor dem Auftreten eines Statorfehlers abgeleitet wurden,

Ableiten eines weiteren Signales, welches einen Wert entsprechend der Größe der ausgewählten harmonischen Komponenten hat, aus dem erfaßten axialen Leckfluß,

Überwachen des weiteren Signales und Erfassen einer Veränderung desselben, um dadurch das Auftreten eines Statorfehlers zu erfassen,

Speichern der Werte des ersten Signales, welche abgeleitet wurden nach dem Auftreten des Statorfehlers, und

Vergleichen der Werte der ersten Signale, die vor und nach dem Auftreten eines Statorfehlers aufgetreten sind und Speichern der Unterschiede zwischen diesen,

dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren weiterhin aufweist:

Bestimmen eines Wertes, welcher die Winkelposition des Statorfehlers bezüglich der Ausgangsposition bestimmt, aus diesem Vergleich, durch:

- (i) Speichern eines Wertes R_1 , der den radialen Abstand der vier Positionen von der Achse des Stators wiedergibt,
- (ii) Speichern eines Wertes R_2 , welcher den mittleren Radius der Statorendwicklung wiedergibt,

- einer ersten Datenverarbeitungseinrichtung zum Überwachen des weiteren Signales und zum Erfassen des Auftretens eines Statorfehlers durch eine Veränderung in dem Wert desselben und

einer zweiten Datenverarbeitungseinrichtung, die auf die erste Datenverarbeitungseinrichtung anspricht, wobei die zweite Datenverarbeitungseinrichtung aufweist:

- (a) Einrichtungen zum Speichern der ersten Signale vor dem Auftreten eines Statorfehlers, und
- (b) Einrichtungen, die auf die Erfassung eines Statorfehlers ansprechen, um die ersten Signale nach dem Auftreten des Fehlers zu speichern,

dadurch gekennzeichnet, daß die Datenverarbeitungseinrichtung weiterhin aufweist:

- (c) Einrichtungen zum Berechnen der ersten Signale der Winkelposition des Statorfehlers bezüglich der Ausgangsposition aus den gespeicherten Werten,
- (d) wobei die Einrichtungen zum Berechnen aufweisen:
 - (d1) eine Einrichtung zum Speichern eines Wertes R_1 , welche den radialen Abstand der vier Positionen von der Achse des Stators wiedergibt,
 - (d2) eine Einrichtung zum Speichern eines Wertes R_2 , welcher den mittleren Radius der Statorwicklung wiedergibt,
 - (d3) eine Einrichtung zum Berechnen von Werten B_1 und B_2 , welche jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, die aus dem erfaßten Fluß an einem diametral gegenüberliegenden Paar der Flußerfassungspositionen abgeleitet wurden,
 - (d4) eine Einrichtung zum Berechnen von Werten B_3 und B_4 , welche jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, die aus dem erfaßten Fluß an dem anderen diametral gegenüberliegenden Paar der Flußerfassungspositionen abgeleitet wurden,
 - (d5) eine Einrichtung zum Berechnen von Werten ψ_1 und ψ_2 , wobei

$$\pm \psi_1 = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2)]$$

$$\pm \psi_2 = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_3 - B_4) / (B_3 + B_4)],$$

- (d6) eine Einrichtung, um daraus die Winkelposition des Statorfehlers ψ_0 bezüglich der Ausgangsposition aus der Beziehung

$$\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 + 90^\circ$$

zu bestimmen, und

- (d7) Anzeigen des Wertes ψ_0 .

Das bevorzugte Verfahren gemäß der Erfindung und eine Vorrichtung hierfür werden jetzt anhand eines Beispiels unter Bezug auf die zugehörigen Zeichnungen beschrieben:

Figur 1 ist eine Kurve, welche die Wellenform der erfaßten magnetomotorischen Kraft (MMF) aufgrund einer kurzgeschlossenen Statorwicklung zeigt,

Figuren 2 und 3 sind Diagramme, welche die Überlegungen veranschaulichen, die bei einer Berechnung des magnetischen Feldes erforderlich sind,

Figur 4 ist ein Diagramm, welches die Geometrie von Sensoren zeigt, die für die Anzeige des axialen Leckflusses verwendet werden,

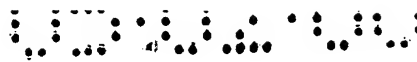
Figur 5 ist eine teilweise schematische Darstellung einer Vorrichtung, die für das Überwachen des axialen Leckflusses verwendet wird,

Figur 6 ist ein Diagramm, welches den generellen Algorithmus veranschaulicht, der für das Erfassen und Lokalisieren eines Statorfehlers verwendet wird, und

Figur 7 ist ein Diagramm, welches den genauen Algorithmus zeigt, der verwendet wird, um den Statorfehler zu lokalisieren.

Grundlegende Prinzipien

Im Falle einer idealen elektrischen Maschine hat man einen axialen magnetischen Nettoleckfluß von Null, da sich die Stator- und Rotorströme wechselseitig exakt auslöschen sollten. In der Praxis tritt jedoch aufgrund von Ungleichmäßigkeiten in den Materialien und den Herstellungsverfahren eine solche Situation nicht auf. Daher tritt bei allen Rotationsmaschinen ein kleiner, jedoch meßbarer axialer Leckfluß auf. Dieser magnetische Fluß kann durch die einfache Maßnahme gemessen werden, daß eine Suchspule oder eine andere geeignete Magnetflußerfassungseinrichtung in unmittelbarer Nähe des Endbereiches der Maschine angeordnet wird. Die Ausgangsgröße von einer solchen Vorrichtung zeigt sich, wenn sie frequenzmäßig analysiert wird, als eine Serie von Harmonischen unterschiedlicher Amplitude. Durch grundlegende elektromagnetische Überlegungen hinsichtlich elektrischer Maschinen ist es möglich, Ausdrücke abzuleiten, die es erlauben, die harmonischen Komponenten, die mit dem axialen Leckfluß notwendigerweise verknüpft sind, vorherzusagen. Die Gleichungen, die einfache algebraische Ausdrücke sind, erfor-



dem nur die Kenntnis der Anzahl von Polen und der Drehgeschwindigkeit der Maschine, um alle möglichen Harmonischen für eine bestimmte Maschine zu berechnen.

Das Auftreten eines Statorfehlers in einem Induktionsmotor führt beispielsweise unvermeidlich zu einer Veränderung in der Verteilung der Raumharmonischen des Luftspaltes. Diese Raumharmonischen können nicht direkt durch eine Suchspule erfaßt werden. Die Suchspule kann jedoch die zeitlichen Harmonischen des axialen Flusses erfassen. Es ist daher notwendig, die Beziehung zwischen den Raum- und den Zeit-Harmonischen abzuleiten, um das von der Suchspule erhaltene Frequenzspektrum korrekt zu interpretieren. Für die Zwecke der vorliegenden Beschreibung und unter Betrachtung nur der Fundamentalfrequenz der Versorgungsspannung sowie der dritten harmonischen Komponente aufgrund von Sättigung ist die Verteilung der Raumharmonischen der MMF aufgrund einer ausgeglichenen bzw. symmetrischen, voll beabstandeten Dreiphasenwicklung, die mit einer symmetrischen Versorgungsspannung, ω , versorgt wird, gegeben durch [1],

$$m = 0,955N_2 [k_{w1} \cos(\omega t - p\theta) + 0,2 k_{w5} \cos(\omega t + 5p\theta) - 0,14 k_{w7} \cos(\omega t - 7p\theta) + 0,09 k_{w11} \cos(\omega t + 11 p\theta) - \dots] \quad (1)$$

wobei

- k_{wn} der n-te Wicklungsfaktor ist,
- p die Anzahl von Polpaaren ist,
- θ die Winkelverschiebung gegenüber dem Ausgangspunkt des Stators ist.

Dieses gibt einen rotierenden Satz von Harmonischen der Ordnung $6n \pm 1$ wieder, der auf die entsprechenden Luftspaltflüsse vereinfacht werden kann,

$$B_a = B_1 \cos(\omega t - p\theta) + B_5 \cos(\omega t + 5p\theta) - B_7 (\cos(\omega t - 7 p\theta) * B_{11} \cos(\omega t + 11 p\theta) \dots \quad (2)$$

wobei B_n der Fluß der räumlichen Harmonischen ist.

Dieser Ausdruck bezieht sich auf den Rahmen des Stators. Dementsprechend ist es, da der Schafffluß des Rotors von Interesse ist, notwendig, die Gleichung (2) auf den Bezugsrahmen des Rotors zu beziehen. Man betrachte die Situation, in welcher β die Winkelverschiebung zwischen den Ausgangspositionen des Rotors und des Stators ist und α als Winkelverschiebung von der Ausgangsposition des Rotors definiert ist. Dann ist $\theta = \alpha + \beta$.

Wenn die Winkelgeschwindigkeit des Rotors ω_r ist, so gilt

$$\theta = \alpha + \omega_r t \quad (3)$$

Unter Verwendung des normalen Ausdrucks für den Schlupf des Motors, d.h. $s = (\omega_s - \omega_r)/\omega_s$, wobei ω_s , die Synchrongeschwindigkeit, $= \omega/p$ ist, erhält man

$$\omega_r = \omega(1-s)/p \quad (4)$$

Nunmehr ist der allgemeine Ausdruck gemäß Gleichung (2)

$$B_{ns} = B_n \cos (\omega t \pm np\theta) \quad (5)$$

wenn man die Gleichungen (3) und (4) in (5) einsetzt, so führt dies zu

$$B_{ns} = B_n \cos [(1 \pm n (1 - s)) \omega t \pm np\alpha] \quad (6)$$

Die Entwicklung des Ausdrucks für die ersten wenigen Terme ergibt

$$\begin{aligned} B_s = & B_1 \cos(\omega t - p\alpha) + B_5 \cos[(6 - 5s) \omega t + 5p\alpha] \\ & - B_7 \cos[7s - 6) \omega t - 7p\alpha] + B_{11} \cos[12 - 11s) + 11 p\alpha] - \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Gleichung (7) liefert die Frequenzkomponenten der Ströme, die in dem Rotor aufgrund der räumlichen Harmonischen des Luftspalts einer ausgeglichenen bzw. symmetrischen Windung und Stromzufuhr induziert werden. Zusätzlich zu diesen Harmonischen, erscheint auch die Grundfrequenz der Stromzufuhrfrequenz in dem axialen Flußspektrum. Die Anwesenheit von zusätzlichen Harmonischen höherer Ordnung kann berücksichtigt werden durch Verwendung des Termes $n\omega$ anstelle von ω .

Wenn die harmonischen Komponenten des axialen Flusses aufgrund von Asymmetrien in einer „gesunden“ (fehlerfreien) Maschine abgeleitet sind, wird nunmehr die Situation betrachtet, in welcher ein Kurzschluß zwischen Windungen eingeführt wird. Der Effekt eines Zwischenwicklungsfehlers liegt darin, daß eine Windung aus der Statorwicklung entfernt ist. Dies hat einen kleinen jedoch endlichen Effekt auf die Verteilung des Hauptluftspaltflusses. Zusätzlich wird eine elektromotorische Kraft (emf) in der kurzgeschlossenen Windung induziert, was zu einem Stromfluß führt, der nur durch die Eigenimpedanz der Fehlstelle limitiert ist. Diese Impedanz bestimmt im wesentlichen die Übergangszeit zwischen Fehlern der Wicklungsisolation und der Isolation zur Massewand.

Der Fehlerstrom aufgrund der kurzgeschlossenen Windung ist die Quelle eines zusätzlichen MMF-Impulses. Dieser MMF-Impuls hat auch eine Verteilung der räumlichen Harmonischen, die der Hauptfeldverteilung überlagert ist. Aus den vorherigen Betrachtungen führt dies zu einer Veränderung in den zeitlichen Harmonischen, die in dem Leckfeld beobachtet werden. Die zu erwartenden Änderungen können auch mathematisch vorhergesagt werden, wie folgt:

Eine einfache Betrachtung der MMF-Verteilung aufgrund eines Kurzschlusses zwischen Wicklungen führt zu der in Figur 1 dargestellten Charakteristik. Dies ist der Fall für eine Vierpolmaschine. Die Analyse, die im folgenden dargelegt wird, betrifft den allgemeinen Fall einer $2p$ -Polmaschine.

Die Fourieranalyse der MMF-Wellenform, die in Figur 1 dargestellt ist, zeigt, daß sie alle Harmonischen außer der vierten enthält, d.h.:

$$B_s = 0,5 \sum B_n \cos (\omega t \pm n\theta), n \neq 4m, \text{ für alle } m \quad (8)$$

Für den allgemeinen Fall würde die entsprechende Wellenform ein Markierungsraumverhältnis von $1: (2p - 1)$ haben, was bewirkt, daß jede $2p$ -te Harmonische abwesend wäre. Dementsprechend sind die Zeitharmonischen, die von dem Rotor erzeugt werden, gegeben durch:

$$B_s = 0,5 \sum B_n \cos [(1 \pm n (1 - s)/p) \omega t \pm n\alpha], n \neq 2m \quad (9)$$

Wenn man der Versorgung Zeitharmonische höherer Ordnung k hinzufügt, so führt dies zu dem vollständig allgemeinen Ausdruck,

$$B_s = 0,5 \sum \sum B_n \cos [(k \pm n (1 - s)/p) \omega t \pm n\alpha], n \neq 2m \quad (10)$$

Obwohl dies eine große Reihe ist, sind nur die Harmonischen niedriger Ordnung signifikant. Das wesentliche Element dieses Ausdruckes ist

$$[k \pm n (1 - s)/p] f_1 \quad (11)$$

für $k = 1, 3$ und $n = 1, 2, 3, \dots, (2p-1)$

Der $n\alpha$ -Term im Argument von (10) bewirkt, daß die oben definierten Komponenten bei der Schlupffrequenz des Rotorstromes schwingen.

Daher kann die folgende Prozedur verwendet werden, um den Statorfehler zu identifizieren:



1. Berechne die Raumharmonischen des Luftspaltes aufgrund der ausbalancierten Versorgung und der Windungszustände.
2. Leite die zugeordneten Ströme (Flüsse) der Zeitharmonischen in Bezug auf den Rotorrahmen und auf den Statorrahmen ab.
3. Beziehe alle zeitharmonischen Komponenten auf den Statorrahmen, da die Suchspule stationär ist. Dies sind die Komponenten, die man in einer „gesunden“ Maschine erwarten sollte.
4. Berechne zusätzliche Raumharmonische, die durch das Auftreten eines Zwischenwicklungs-Kurzschlusses injiziert werden.
5. Setze diese zu zusätzlichen Zeitharmonischen in dem Spektrum des Axialfeldes in Beziehung.
6. Suche nach Veränderungen in diesen Komponenten, die für eine gegebene Maschine vorhergesagt werden können, um die Anwesenheit eines Zwischenwicklungsfehlers anzuzeigen.

Wenn man festgestellt hat, daß der Zustand eines Statorfehlers vorliegt, ist es die nächste Aufgabe, die Position des Fehlers innerhalb der Statorwicklung zu lokalisieren. Das Einführen einer kurzgeschlossenen Windung in der Statorwicklung ruft eine Asymmetrie in dem Magnetfeld der Endwicklung der Maschine hervor. Dies liegt daran, daß der Kurzschlußstrom, der in dem Fehlerbereich fließt, nicht durch einen gleichen Strom ausgeglichen wird, der in dem entsprechenden Phasengurt fließt, der der fehlerhaften Wicklung diametral gegenüberliegt. Durch Messen der Asymmetrie in dem Magnetfeld der Endwicklung kann also die Position der fehlerhaften Spule innerhalb der Statorwicklung bestimmt werden.

Die Technik beruht auf der Verwendung einer Anordnung von zumindest vier Suchspulen oder anderen passenden Sensoren, die axialsymmetrisch um die Antriebswelle des Motors verteilt sind. Diese Spulen liefern eine lokale Messung des Magnetfeldes in dem Endbereich bzw. Stirnseitenbereich der Maschine. Durch Triangulation der Ausgangsgrößen von den Suchspulen ist es möglich, den Ort der Statorspule, welche den Kurzschluß zwischen Wicklungen enthält, zu bestimmen. Um diese Funktion auszuführen ist es notwendig, einen Ausdruck für das Feld an jedem beliebigen Punkt des Umfangs eines Kreises zu entwickeln, der durch die Zentren der Suchspulen verläuft, und zwar aufgrund des in der Endwicklung einer beliebig positionierten

Windung der Statorwicklung verlaufenden Stromes. Durch Aufrufen bzw. Anwenden des Biot-Savart'schen Gesetzes und gemäß Figur 2 kann man ableiten,

$$d\vec{B} = (\mu_0 I d\vec{x} \times \vec{a}_z) / 4\pi r^2 \quad (12)$$

wobei

\vec{B} der magnetische Feldstärkenvektor ist

μ_0 die Permeabilität des freien Raumes ist

\vec{a}_z der Einheitsvektor in Z-Richtung ist.

Aus Figur 2 und unter Umschreiben der Gleichung (12) erhält man

$$dB = (\mu_0 I d\sin\Phi) / 4\pi r^2 \quad (13)$$

da jedoch $d\sin\Phi = r d\theta$, ist

$$dB = (\mu_0 I d\theta) / 4\pi r^2 \quad (14)$$

Figur 3 zeigt den allgemeinen Fall, in welchem die kurzgeschlossene Windung um einen Winkelbetrag Ψ versetzt ist, ausgehend von einer beliebigen Ausgangsposition. In diesem Fall ist R_2 der mittlere Radius der Endwicklung und R_1 ist der Radius des Kreises, auf welchem das Feld berechnet werden soll. Es sei angenommen, daß die Kreise koplanar und konzentrisch sind. Die Länge eines Bogens der Spule ist L und der Feldmeßpunkt ist um einen Winkel δ von der Ausgangsposition verschoben. Unter Verwendung des Cosinussatzes erhält man:

$$r^2 = R_1^2 - 2R_1R_2\cos(\varphi + \delta) \quad (15)$$

Falls R_2 wesentlich größer als R_1 ist, so ist $L = r\theta$ und damit

$$\theta = L/[R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos(\psi + \delta)]^{0.5} \quad (16)$$

Aus den Gleichungen (14) und (16) ist der Wert von B am Feldpunkt B gegeben durch

$$B = \mu_0 I L / [4\pi (R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos(\Psi + \delta))] \quad (17)$$

Durch Fixieren der Position einer Anzahl von Spulen bezüglich der Ausgangsposition und durch beliebiges Zuordnen einer Bezugsspule bei $\delta = 0$ kann man den Wert von B bei jeder Spule als

eine Funktion von Ψ erhalten. Aus den gemessenen Werten von B kann man Ψ erhalten und dementsprechend die Position der fehlerhaften Windung.

Um das Erfassungsschema zu optimieren ist es notwendig, die minimale Anzahl von Spulen zu bestimmen, die für eine einfache und zuverlässige Fehlerlokalisierung erforderlich sind.

Man betrachte den Fall, in welchem zwei Spulen um 180° versetzt sind. Jede Spule hat eine induzierte emf (elektromotorische Kraft), die proportional zu dem hindurchtretenden Fluß ist. Bezüglich der Figur 4 und indem man annimmt, daß die Spule bei Position 1 die Ausgangsposition hat, erhält man aus Gleichung (17)

$$B_1 = k(a - b \cos \Psi) \quad (18)$$

und

$$B_2 = k(a - b \cos(\Psi + 180^\circ)) \quad (19)$$

und damit:

$$B_2 = k(a + b \cos \Psi) \quad (20)$$

wobei

$$k = \mu_0 I L / 4\pi$$

$$a = (R_1^2 + R_2^2)$$

$$b = 2R_1 R_2.$$

Aus den Gleichungen (18) und (20) und nach einiger Umordnung der Terme erhält man

$$\cos \Psi = [a (B_1 - B_2)] / [b(B_1 + B_2)] \quad (21)$$

Diese Ausdrücke lokalisieren den Fehler innerhalb von $\pm \Psi$, da

$$\pm \Psi = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) \{(B_1 - B_2) / (B_1 + B_2)\}] \quad \dots(22)$$

In der Praxis können die gemessenen Werte der in den Spulen induzierten emf verwendet werden, da die B -Werte in Gleichung (22) im Verhältnis zueinander stehen.

Dementsprechend sollten die Werte, welche verwendet werden, wenn man eine Fehlerlokalisierung versucht, die Amplituden der Unterschiede zwischen den „gesunden“ und den „fehlerhaften“ Zuständen sein. Um den Fehler eindeutig zu lokalisieren, ist ein Satz von Spulen, 3 und 4, erforderlich, wie in Figur 4 dargestellt. Der Bequemlichkeit halber sind sie unter rechtem Winkel zur Symmetrieachse der Spulen 1 und 2 getrennt angeordnet. Eine Wiederholung des Lokalisierungsvorganges in derselben Art und Weise wie oben mit dem zweiten Satz von Spulen ergibt $\pm\psi_{p2}$, was sich von $\pm\psi_{p1}$ unterscheidet, das man aus den Spulen 1 und 2 erhalten hat. Wenn das Spulensignal mit dem größeren Wert als derjenige Punkt ausgewählt wird, von welchem aus gemessen wird, so fällt ψ immer in den Bereich von 0 bis 90°. Zusätzlich enthält nur ein Quadrant eine Winkelposition, die unter der Verwendung beider Sätze von Spulen identifiziert bzw. gekennzeichnet wird. Dies ist die näherungsweise Position des Fehlers.

Um den Vorgang zum Lokalisieren der Position einer fehlerhaften Spule innerhalb der Statorwicklung zu klären, wird auf Figur 4 Bezug genommen. Für den Zweck des Lokisierungsalgorithmus sind die Spulen zu Paaren gruppiert. In diesem Fall bilden die Spulen 1 und 2 ein Paar und die Spulen 3 und 4 bilden das andere Paar.

Zu Beginn wird zu einem Zeitpunkt, zu welchem man den Motor als gesund betrachtet, der induzierte emf-Wert an jeder der Spulen gemessen und aufgezeichnet. Für den Fall, daß ein Zwischenwicklungs-Kurzschluß auftritt, werden die emf-Werte jeder der Spulen wiederum aufgezeichnet. Diese letzteren Werte werden von den anfänglichen Werten subtrahiert und man nimmt die Amplitude der Resultierenden. Im Anschluß werden die auf diese Weise abgeleiteten positiven Zahlen, d.h. B_1 , B_2 , B_3 und B_4 in den Fehlerlokisierungsalgorithmus eingegeben. Dieser Vorgang liefert zwei Ausdrücke,

$$\pm\psi_{p1} = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) ((B_1 - B_2) / (B_1 + B_2))]$$

und

$$\pm\psi_{p2} = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) ((B_3 - B_4) / (B_3 + B_4))]$$

Die Ergebnisse aus diesen Ausdrücken sind Winkel. Als Bezugspunkt werden von jedem Paar die Spulen genommen, an welchen der größte emf-Wert aufgezeichnet wurde. Wenn zum Beispiel Spule 1 von den Spulen 1 und 2 den größten Ablesewert hatte, so würde man sagen, daß die Position des Fehlers bei $\pm\psi_{p1}$ von der Spule 1 aus liegt. In ähnlicher Weise würde der Fehler, wenn die Ablesung an Spule 4 die größere der Ablesungen an den Spulen 3 und 4 war, den Fehler bei $\pm\psi_{p2}$ von Spule 4 aus lokalisieren. Demnach ist es ein einfacher Schritt, den Schluß zu ziehen, daß in diesem Fall der Fehler in dem Quadranten zwischen den Spulen 1 und 4 bei der Winkelposition $\psi_{p1} - \psi_{p2}/2$ liegt.



Zusammengefaßt ist das Erfassungs- und Lokalisierungsschema folgendes:

Man berechne aus den Maschinenparametern die axialen Leckflußkomponenten unter Normalbedingungen.

Man berechne, welche Harmonischen sich als Folge einer Suche nach einem Kurzschluß zwischen Wicklungen für diese Komponenten in dem axialen Leckfluß der Maschine verändern, und

bei Anzeige eines Fehlers Anwenden der Fehlerlokalisierungstechnik wie sie oben beschrieben wurde.

Umsetzung des Verfahrens

Figur 5 zeigt eine bevorzugte Vorrichtung, die verwendet wird, um das Auftreten einer kurzgeschlossenen Wicklung der Statorwicklung 11 eines Induktionsmotors 10 zu erfassen und zu lokalisieren, indem Veränderungen in dem axialen Leckfluß während des Betriebes des Motors überwacht werden. Die Vorrichtung weist zwei Teilsysteme auf, nämlich eine Einrichtung für das Abfühlen des axialen Leckflusses und eine Einrichtung für das Verarbeiten der daraus abgeleiteten Signale. Ein weiteres Teilsystem, welches in einigen Fällen notwendig sein kann, ist eine Art von Geschwindigkeitsmessung, um ein Maß des Schlupfes des Motors unter Last zu erhalten.

Die Flußsensoren, die in Figur 5 dargestellt sind, sind Spulen 13 mit Luftkern, welche preiswert und leicht herzustellen sind. Eine bevorzugte Position der Suchspulen ist axialsymmetrisch mit der Antriebswelle des Motors, entweder innerhalb oder außerhalb der Motorumhüllung. In der dargestellten Ausführungsform gibt es vier Suchspulen 13, die symmetrisch um die Achse des Motors neben einer Endwicklung des Stators 11 verteilt sind. Im Prinzip könnten mehr als vier Suchspulen vorhanden sein, aber die Verwendung von vier Suchspulen, die als diametral gegenüberliegende Paare angeordnet sind, vereinfacht die Signalverarbeitungsvorgänge und den Schaltkreis.

Eine Geschwindigkeitsmessung kann, falls erforderlich, auf eine Anzahl von Arten bewerkstelligt werden. In einigen Fällen ist eine Geschwindigkeitsinformation in dem Motorsteuerzentrum der Anlage verfügbar. Es ist jedoch auch möglich, daß einige Arten von Wandlersystemen notwendig sind. Ein Maß für die Drehgeschwindigkeit des Rotors wird benötigt, um den Schlupf des Motors zu berechnen. Der Schlupf ist erforderlich, weil die Harmonischen des axialen Leckflusses von dem Schlupf des Motors abhängen. Die Drehgeschwindigkeit kann man leicht erhalten, indem man die Zeiten mißt, die ein Bezugspunkt auf der Antriebswelle für die Vollendung einer Umdrehung benötigt. In der Praxis kann man dieses vornehmen durch Aufmalen eines Streifens auf die Antriebswelle und Verwenden einer Einrichtung, wie zum Beispiel eines Fototransistors, um je-



desmal, wenn der Streifen unter dem Fototransistor hindurchläuft, einen elektrischen Impuls zu erzeugen.

Es ist notwendig, die von den Suchspulen abgeleiteten Spannungssignale, welche normalerweise nur wenige Millivolt betragen, aufzuarbeiten. Um diese Signale auf besser handhabbare Niveaus zu bringen, werden sie durch Vorverstärker 14 verstärkt. Weiterhin werden die Signale, um die Komponente mit der Stromversorgungsfrequenz zu entfernen, die relativ hoch ist und sehr wahrscheinlich die nachfolgenden Verstärkerstufen in die Sättigung bringen könnte, durch Bereichsfilter 15 für die Stromversorgungsfrequenz gefiltert. Alternativ können Verstärker mit sehr großem Dynamikbereich verwendet werden. Die vier Analogsignale werden nach der Aufarbeitung digitalisiert, um jeweils „erste“ Signale zu erzeugen, die Größen bzw. Werte haben, welche dem harmonischen Fluß entsprechen, der durch die vier Suchspulen 13 erfaßt wurde. Diese „ersten“ Signale werden anschließend durch einen Computer 16 weiterverarbeitet, wie im folgenden beschrieben wird, um die Winkelposition eines erfaßten Statorfehlers zu bestimmen.

Die Analogsignale von den Bereichsfiltern bzw. Kerbfiltern 15 werden außerdem durch einen summierenden Verstärker 17 aufsummiert, wobei das Summensignal dann digitalisiert wird. Dieses Summensignal muß nun in seine harmonischen Komponenten zerlegt werden. Zwei praktische Ansätze sind für diese Aufgabe möglich. Unter der Annahme, daß die Komponenten des axialen Leckflusses mathematisch vorhersagbar sind, kann ein Satz von Filtern, die auf die interessierenden Frequenzen abgestimmt sind, verwendet werden. Die Ausgänge dieser Filter können auf Veränderungen überwacht werden, welche möglicherweise das Einsetzen eines Fehlerzustandes anzeigen. In der Praxis ist in Anbetracht der Vielzahl von Motorgestaltungen, die vorhanden sind, die Konstruktion von diskreten Filtern, die auf die Motorparameter maßgeschneidert sind, kein brauchbarer Ansatz. Durch Verwenden digital gesteuerter Analogfilter ist es jedoch möglich, eine Filteranordnung aufzustellen, die in einfacher Weise für den speziellen Motor maßgeschneidert werden kann. Zum Beispiel kann ein einzelner regelbarer Filter der Reihe nach durch die vorbestimmten interessierenden Frequenzen abgestuft werden. Das bevorzugte Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung, die Signale in ihre harmonischen Bestandteile zu zerlegen, besteht darin, das Signal des Summenverstärkers 17 zu digitalisieren und das digitale Signal in den Frequenzraum zu transformieren mit Hilfe einer schnellen Fourier-Transformation (FFT). Auf diese Weise wird ein weiteres Signal, welches einem Wert entsprechend der Größe der ausgewählten harmonischen Komponenten des axialen Leckflusses entspricht, abgeleitet. Die harmonischen Komponenten werden als diejenigen ausgewählt, welche in signifikanter Weise durch das Auftreten eines Statorfehlers beeinflußt werden.

Das bevorzugte Verfahren wird nun unter Bezug auf die Figuren 6 und 7 beschrieben.

Um das Auftreten eines Statorfehlers durch Überwachen von Veränderungen in dem axialen Leckfluß zu erfassen, ist es zunächst notwendig, die Frequenzen der harmonischen Komponenten zu identifizieren, die durch dieses Auftreten signifikant beeinflußt werden. Diese können aus den Maschinenparametern und den Bedingungen, unter welchen der Motor arbeitet, berechnet werden.

Gemäß Figur 6 ist das Erste was man tun muß, die Eingabe der relevanten Eingabeparameter in den Computer, insbesondere der Anzahl der Pole des Motors und seiner nominellen Geschwindigkeit (BLOCK 21). Aus diesen Parametern werden die harmonischen Komponenten des axialen Leckflusses unter fehlerhaften und fehlerfreien Bedingungen berechnet (BLOCK 22). Wenn der Motor unter Last steht (BLOCK 23), so muß die Rotorgeschwindigkeit berücksichtigt werden (BLOCK 24); in jedem Fall werden die Ergebnisse der Berechnung in den Initialisierungsvorgang (BLOCK 25) eingegeben. Die aufsummierten Ausgangsgrößen aus den Suchspulen werden für eine erste Zeitdauer $t(n)$ aufgezeichnet und in den Frequenzraum transformiert, $\rightarrow A(f, t(n))$ (BLOCK 26), wie zuvor schon beschrieben wurde. Die Ergebnisse werden getestet (BLOCK 27) und sollten die Gleichungen von (BLOCK 23) bestätigen.

Der nächste Schritt in dem Vorgang ist das Messen und Aufzeichnen des Summenausganges der induzierten emf an jeder der Suchspulen für eine zweite Zeitdauer $t(n + 1)$, und transformiert in den Frequenzraum, $\rightarrow A(f, t(n + 1))$ (BLOCK 29). Wenn eine möglicher Fehler erfaßt wird durch Anwenden des Tests

$$A(f, t(n + 1)) > A(f, t(n)) \text{ (BLOCK 30)}$$

so wird der Summenausgangswert von den Suchspulen gemessen und für eine dritte Zeitdauer aufgezeichnet und in den Frequenzraum transformiert, $\rightarrow A(f, t(n + 2))$ (BLOCK 31). Der mögliche Fehler wird bestätigt oder ignoriert, indem getestet wird, ob

$$A(f, t(n + 2)) > A(f, t(n)) \text{ (BLOCK 32)}$$

Wenn das Ergebnis positiv ist, so wird der Fehler bestätigt, anderenfalls kann angenommen werden, daß der scheinbare Fehler auf einem nur zeitweisen oder gelegentlichen Ereignis auftrat.

Wenn der Fehler bestätigt wird, so wird der rms-Wert der induzierten emf in jeder der Suchspulen in dem fehlerhaften Zustand des Motors gemessen und aufgezeichnet (BLOCK 33). Der emf-Wert für den Fehlerzustand wird von dem gespeicherten emf-Wert für den gesunden Zustand für jede Suchspule abgezogen und die Amplitude des Unterschiedes wird verwendet (BLOCK 34). Von den so erhaltenen Amplitudenwerten kann die Winkelposition des Fehlers bezüglich einer



Ausgangsposition berechnet werden (BLOCK 35), wie es unter Bezug auf Figur 7 beschrieben wird. Das Auftreten des Statorfehlers und seine Position in der Statorwicklung werden dann dargestellt (BLOCK 36).

Nach der Bestätigung des Auftretens eines Statorfehlers (BLOCK 32), wird die Winkelposition des Fehlers bestimmt durch Verwenden des in Figur 7 dargestellten Algorithmus. Dieser Algorithmus beinhaltet die Verwendung von Werten, die aus Signalen abgeleitet wurden, die man nach dem Auftreten des Fehlers erhalten hat, wie im folgenden beschrieben wird, ebenso wie die folgenden Werte:

R_1 = Radius des Kreises, auf welchem die Achsen der Suchspulen liegen, dieser Wert ist anfänglich eingegeben und gespeichert worden;

R_2 = mittlerer Radius der Endwicklung des Stators, dieser Wert ist anfänglich eingegeben und gespeichert worden;

EMF (gesund)

= Werte der „ersten“ Signale, die von den Suchspulen abgeleitet wurden, diese Werte sind vor dem Auftreten des Fehlers gespeichert worden.

Gemäß Figur 7 wurde zuvor die Anzahl der Suchspulen n in den Computer eingegeben und gespeichert (BLOCK 41). Im vorliegenden Beispiel ist $n = 4$ und in dem Algorithmus werden die einzelnen Suchspulen identifiziert durch einen Buchstaben x , wobei $x = 1, x = 2, x = 3$ bzw. $x = 4$.

Die Signale von den Suchspulen, die zuvor als „erste“ Signale bezeichnet wurden, werden der Reihe nach untersucht (BLÖCKE 42, 43, 44). Das „erste“ Signal von jeder der Suchspulen entspricht dem axialen Leckfluß, der von der Suchspule erfaßt wurde und der aus dem Spannungssignal abgeleitet wurde, welches ein Maß des rms-Werte der in der Spule induzierten emf ist. Der Wert dieses Signals, der durch EMF bezeichnet wird (fehlerhaft, Position x), wird von dem zuvor gespeicherten Wert des Signales EMF (gesund, Position x) (BLOCK 40) subtrahiert, und die Amplitude $|B(x)|$ wird verwendet (BLOCK 46).

Der Computer hat nun alle erforderlichen Werte und Parameter gespeichert, aus welchen die Winkelposition des Statorfehlers berechnet werden kann, nämlich $R_1, R_2, B_1, B_2, B_3, B_4$. Aus diesen Werten werden die folgenden Beziehungen abgeleitet (siehe BLOCK 47):

$$\pm \Psi_1 = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) ((B_1 - B_2) / (B_1 + B_2))]$$

$$\pm \Psi_2 = \cos^{-1} [0,5 (R_1/R_2 + R_2/R_1) ((B_3 - B_4) / (B_3 + B_4))]$$



Da $\psi = \psi_2 + 90^\circ$, kann die erforderliche Winkelposition des Fehlers ψ_0 bestimmt werden. Mit anderen Worten, der Quadrant, innerhalb dessen der Fehler liegt, kann in einfacher Weise bestimmt werden.

Wenn man also das erste Paar von diametral gegenüberliegenden Suchspulen 1, 2 betrachtet, so muß man bestimmen, ob $EMF(\text{Fehler}, 1)$ größer oder kleiner als $EMF(\text{Fehler}, 2)$ ist (BLOCK 48): Wenn sie größer ist, so ist der Fehler in einer der Positionen $\pm\psi_1$ von Spule (BLOCK 49). Wenn sie kleiner ist, so ist der Fehler an einer der Positionen $\pm\psi_1$ von Spule 2, (BLOCK 50). Um die Mehrdeutigkeit aufzulösen, muß man nunmehr bestimmen, ob $EMF(\text{Fehler}, 3)$ größer oder kleiner als $EMF(\text{Fehler}, 4)$ ist (BLOCK 51). Wenn sie größer ist, so befindet sich der Fehler an der Position $\pm\psi_2$ von Spule 3 aus (BLOCK 52), während dann, wenn sie kleiner ist, der Fehler an einer der Positionen $\pm\psi_2$ von Spule 4 liegt (BLOCK 53). Der Fehler liegt offenbar in dem Quadranten, der durch $\pm\psi_1$ und $\pm\psi_2$ bestimmt ist (BLOCK 54), d.h., die Winkelposition ψ_0 des Fehlers bezüglich der Datumsposition ist gegeben durch:

$$\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 + 90^\circ.$$

Diese Position wird zusammen mit dem Hinweis, daß ein Fehler aufgetreten ist, angezeigt.

93 300 513.4 - 0 552 991

Ontario Hydro

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erfassen und Lokalisieren von Statorfehlern in einer dynamoelektrischen Maschine mit einem Rotor und einem Stator, mit Statorspulen mit mehreren Wicklungen, durch Überwachen von Veränderungen des axialen Leckflusses während des Betriebes der Maschine, mit den Merkmalen:

Identifizieren der Frequenzen ausgewählter harmonischer Komponenten des axialen Leckflusses, die durch das Auftreten eines Statorfehlers in signifikanter Weise beeinflusst werden sollten,

Erfassen des axialen Leckflusses an jeder von zumindest vier Positionen, einschließlich einer Ausgangsposition, welche symmetrisch um die Achse des Rotors in der Nähe einer Entwicklung des Stators verteilt sind,

Ableiten eines ersten Signals aus dem erfaßten Fluß an jeder der Positionen, wobei das Signal einen Wert hat, welcher der Größe des erfaßten Flusses entspricht,

Speichern der Werte der ersten Signale, die vor dem Auftreten eines Statorfehlers abgeleitet wurden,

Ableiten eines weiteren Signals aus dem erfaßten axialen Leckfluß, wobei das Signal einen Wert hat, welcher der Größe der ausgewählten harmonischen Komponenten entspricht,

Überwachen des weiteren Signals und Erfassen einer Veränderung desselben, um dadurch das Auftreten eines Statorfehlers zu erfassen,

Speichern der Werte der nach dem Auftreten des Statorfehlers abgeleiteten ersten Signale, und

Vergleichen der Werte der ersten Signale, die vor und nach dem Auftreten eines Statorfehlers gespeichert wurden und Speichern der Unterschiede dazwischen,

dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren weiterhin aufweist:



aus dem Vergleich Bestimmen eines Wertes, welcher die Winkelposition eines Statorfehlers bezüglich der Ausgangsposition wiedergibt, durch:

- (i) Speichern eines Wertes R_1 , welcher den radialen Abstand der vier Positionen von der Achse des Stators wiedergibt,
- (ii) Speichern eines Wertes R_2 , welcher den mittleren Radius der Statorentwicklung wiedergibt,
- (iii) Berechnen von Werten B_1 und B_2 , die jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, welche von dem erfaßten Fluß an einem diametral gegenüberliegenden Paar der Flußerfassungspositionen abgeleitet wurden,
- (iv) Berechnen von Werten B_3 und B_4 , welche jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, die von dem erfaßten Fluß an dem andern diametral gegenüberliegenden Paar von Flußerfassungspositionen abgeleitet wurden,
- (v) Berechnen von Werten ψ_1 und ψ_2 , wobei
$$\pm \psi_1 = \cos^{-1} [0,5(R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2)]$$
$$\pm \psi_2 = \cos^{-1} [0,5(R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_3 - B_4) / (B_3 + B_4)]$$
- (vi) daraus Bestimmen der Winkelposition des Statorfehlers ψ_0 bezüglich der Ausgangsposition gemäß der Beziehung

$$\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 + 90^\circ$$

und (vii) Anzeigen des Wertes ψ_0 .

- 2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Speichern der ersten Signale, welche nach dem Auftreten eines Statorfehlers abgeleitet wurden, durch die Erfassung des Fehlers ausgelöst wird.
- 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der axiale Leckfluß an jeder der vier Positionen erfaßt wird, einschließlich der Ausgangsposition, welche symmetrisch um die Achse verteilt sind.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Spektrum des axialen Leckflusses analysiert wird durch

Ableiten jeweils eines Spannungssignals, welches dem erfaßten Leckfluß an jeder der Mehrzahl von Positionen entspricht, Aufsummieren der abgeleiteten Spannungssignale, Digitalisieren der Summe der Spannungssignale und Transformieren des digitalisierten Signals in den Frequenzraum bzw. die Frequenzdomäne mit Hilfe einer schnellen Fourier-Transformation.

5. Vorrichtung zum Erfassen und Lokalisieren von Statorfehlern in einem Induktionsmotor (10) durch Überwachen von Veränderungen in dem axialen Leckfluß während des Betriebes des Motors, mit:

einer Einrichtung (13) zum Erfassen des axialen Leckflusses während des Motorbetriebes, wobei die Einrichtung Einrichtungen für das Ableiten einer Mehrzahl erster Signale aufweist, die jeweils einen Wert haben, welcher dem erfaßten Fluß an jeweils einer von zumindest vier Positionen entspricht, und zwar einschließlich einer Ausgangsposition, welche um die Achse des Motors verteilt sind,

Einrichtungen für das Ableiten eines weiteren Signals aus dem erfaßten Fluß, welches der Größe des erfaßten Flusses bei ausgewählten harmonischen Frequenzen entspricht,

einer ersten Datenverarbeitungseinrichtung (16) zum Überwachen des weiteren Signals und zum Erfassen des Auftretens eines Statorfehlers durch eine Veränderung in dessen Wert, und

einer zweiten Datenverarbeitungseinrichtung (16), die auf die erste Datenverarbeitungseinrichtung reagiert, wobei die zweite Datenverarbeitungseinrichtung aufweist:

- (a) Einrichtungen zum Speichern der ersten Signale vor dem Auftreten eines Statorfehlers, und
- (b) Einrichtungen, welche auf die Erfassung eines Statorfehlers ansprechen, um die ersten Signale nach dem Auftreten des Fehlers zu speichern,

dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Datenverarbeitungseinrichtung weiterhin aufweist:

- (c) Einrichtungen zum Berechnen der Winkelposition des Statorfehlers bezüglich der Ausgangsposition aus den gespeicherten Werten der ersten Signale,
 - (d) wobei die Einrichtung für das Berechnen aufweist:
 - (d1) Einrichtungen für das Speichern eines Wertes R_1 , welcher den radialen Abstand der vier Positionen von der Achse des Stators wiedergibt,
 - (d2) eine Einrichtung für das Speichern eines Wertes R_2 , welcher den mittleren Radius der Statorentwicklung wiedergibt,
 - (d3) eine Einrichtung für das Berechnen von Werten B_1 und B_2 , welche jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, die aus dem erfaßten Fluß an einem diametral gegenüberliegenden Paar der Flußerfassungspositionen erfaßt wurden,
 - (d4) eine Einrichtung für das Berechnen von Werten B_3 und B_4 , welche jeweils den Amplituden der Unterschiede zwischen den gespeicherten Werten der ersten Signale entsprechen, die aus dem erfaßten Fluß an dem anderen diametral gegenüberliegenden Paar von Flußerfassungspositionen abgeleitet wurden,
 - (d5) eine Einrichtung für das Berechnen von Werten ψ_1 und ψ_2 , wobei

$$\pm \psi_1 = \cos^{-1} [0,5(R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2)]$$

$$\pm \psi_2 = \cos^{-1} [0,5(R_1/R_2 + R_2/R_1) \cdot (B_3 - B_4) / (B_3 + B_4)],$$
 - (d6) eine Einrichtung, um daraus die Winkelposition des Statorfehlers ψ_0 bezüglich der Ausgangsposition zu bestimmen, und zwar gemäß der Beziehung

$$\pm \psi_0 = \psi_1 = \psi_2 + 90^\circ$$
 - und (d7) Anzeigen des Wertes ψ_0 .
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei die Einrichtung für das Erfassen des axialen Leckflusses vier Flußsensorenspulen (13) aufweist, die symmetrisch um die Achse des Stators (11) in der Nähe einer Endwicklung desselben montiert sind.

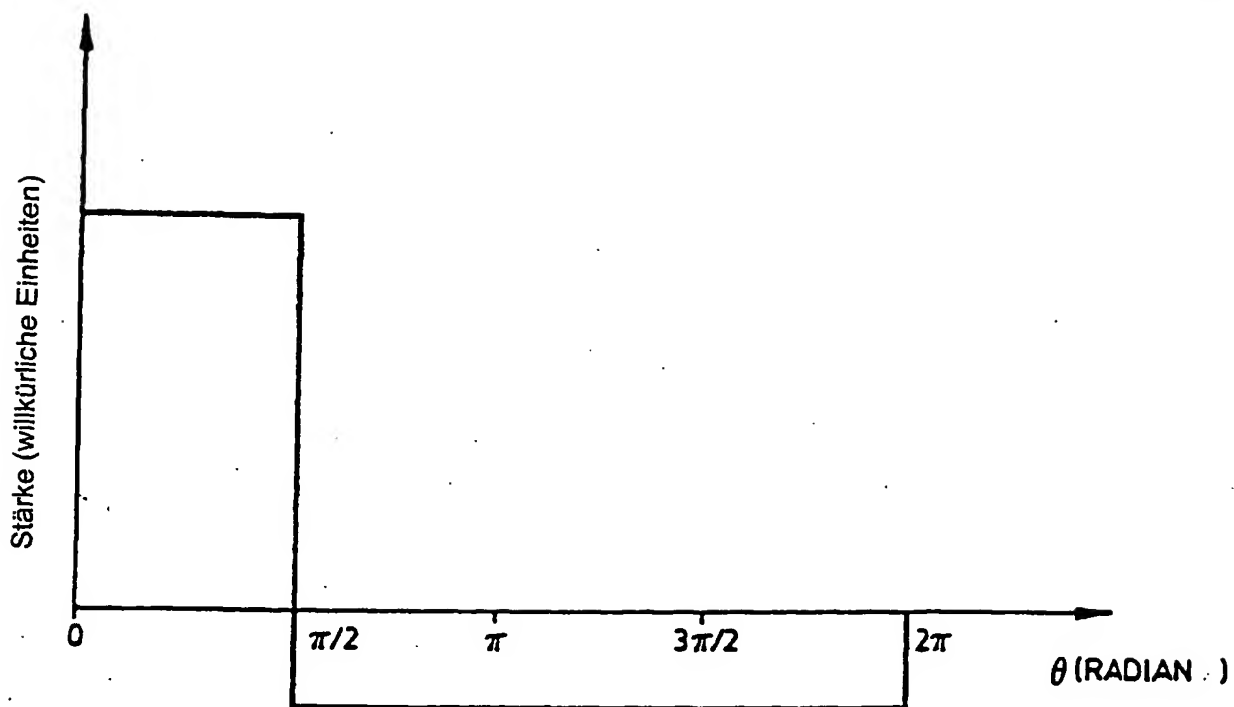


FIG. 1

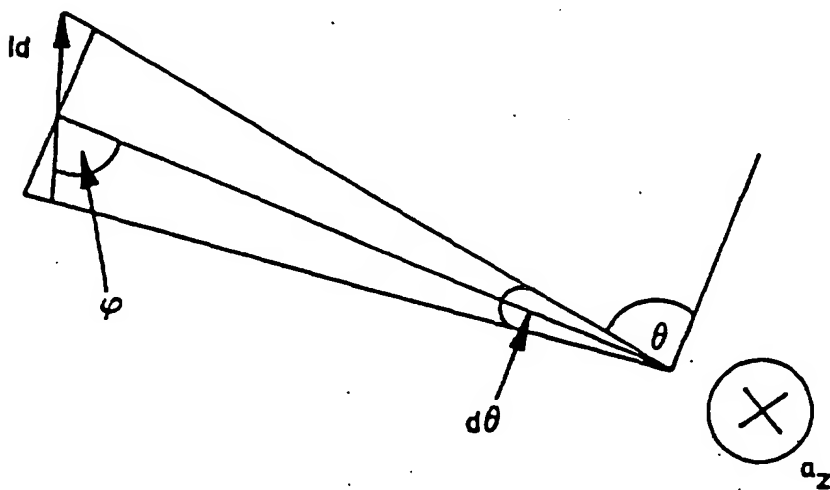


FIG. 2

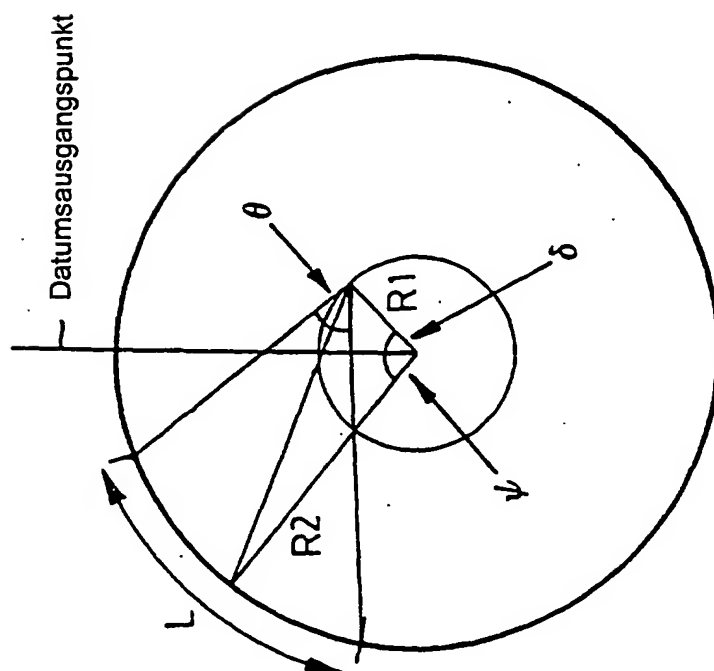


FIG. 3

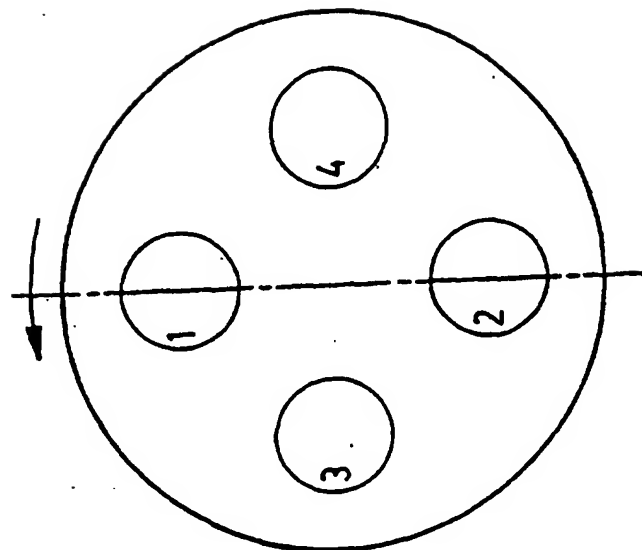


FIG. 4

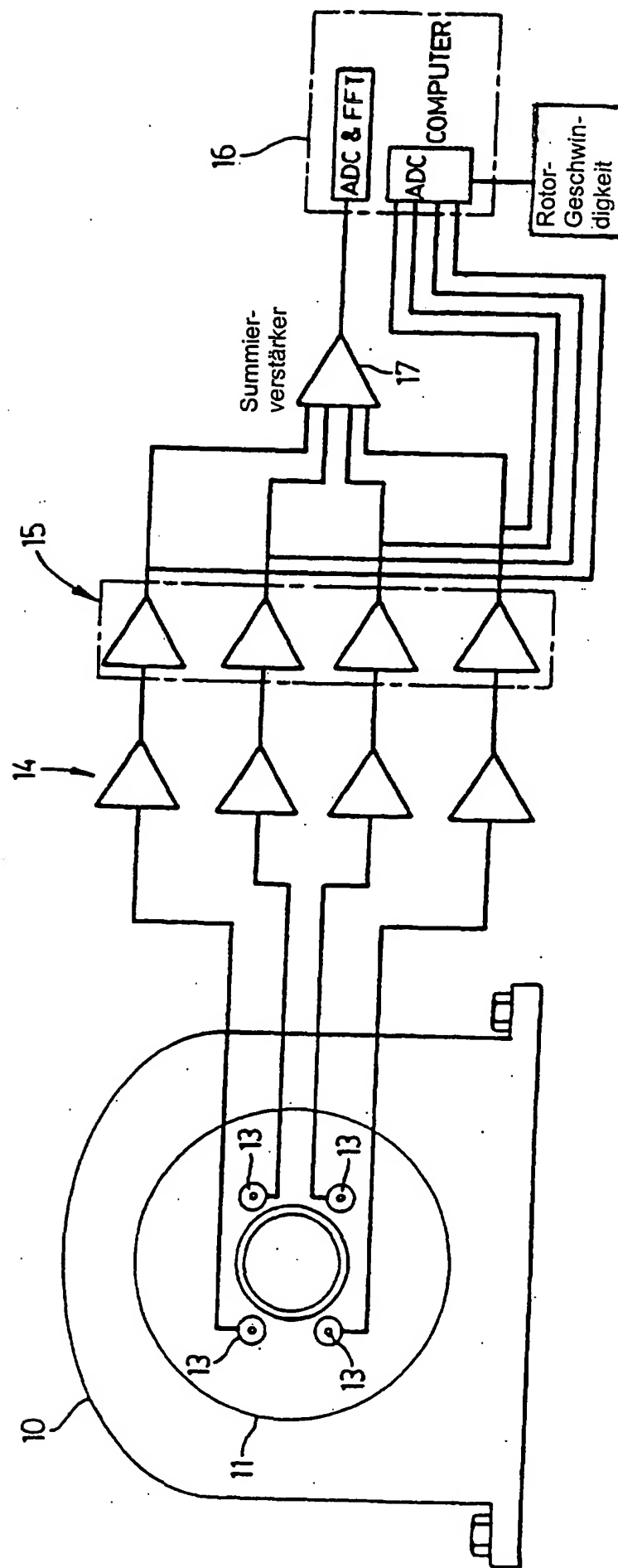


FIG. 5

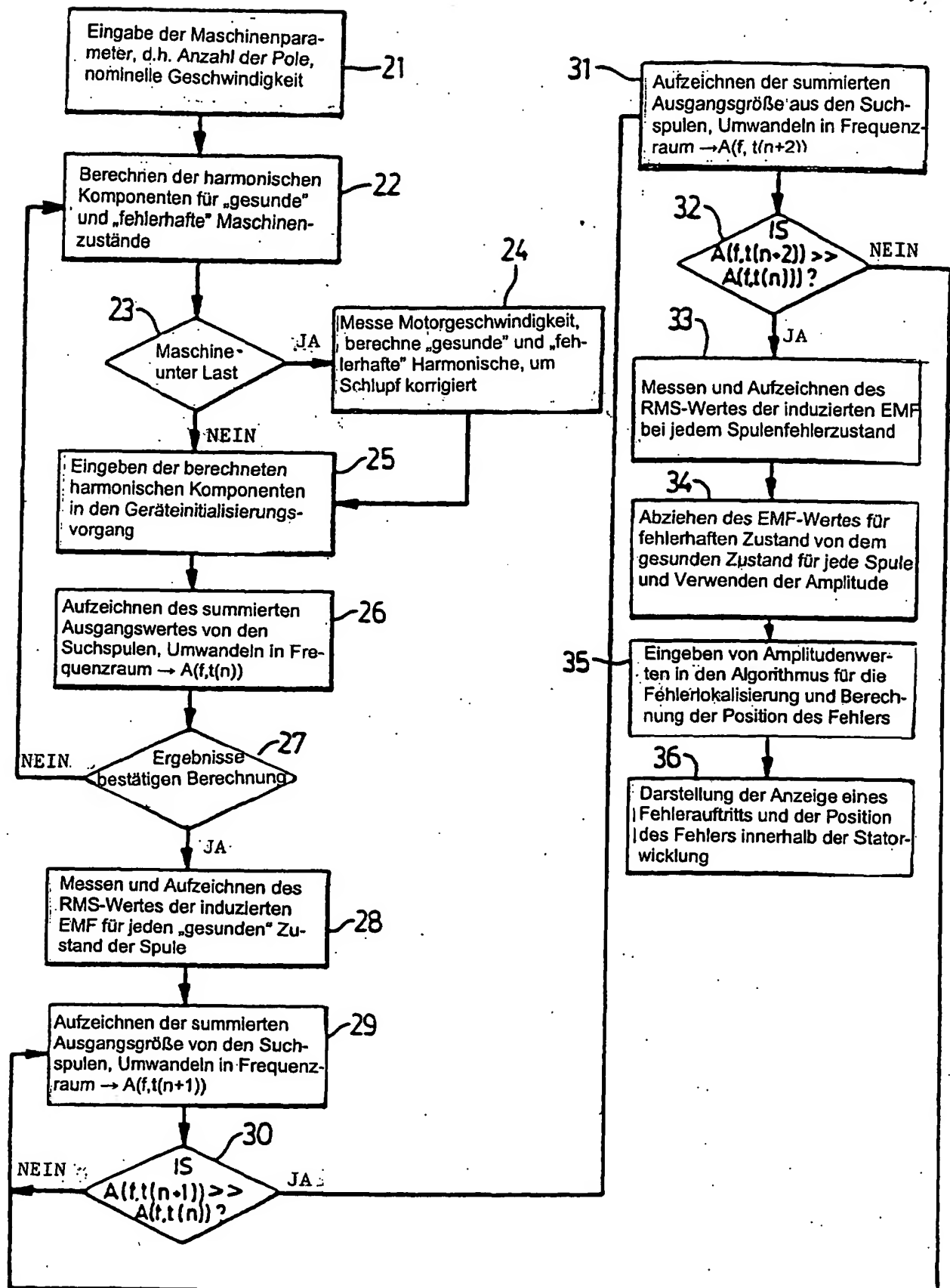


FIG. 6

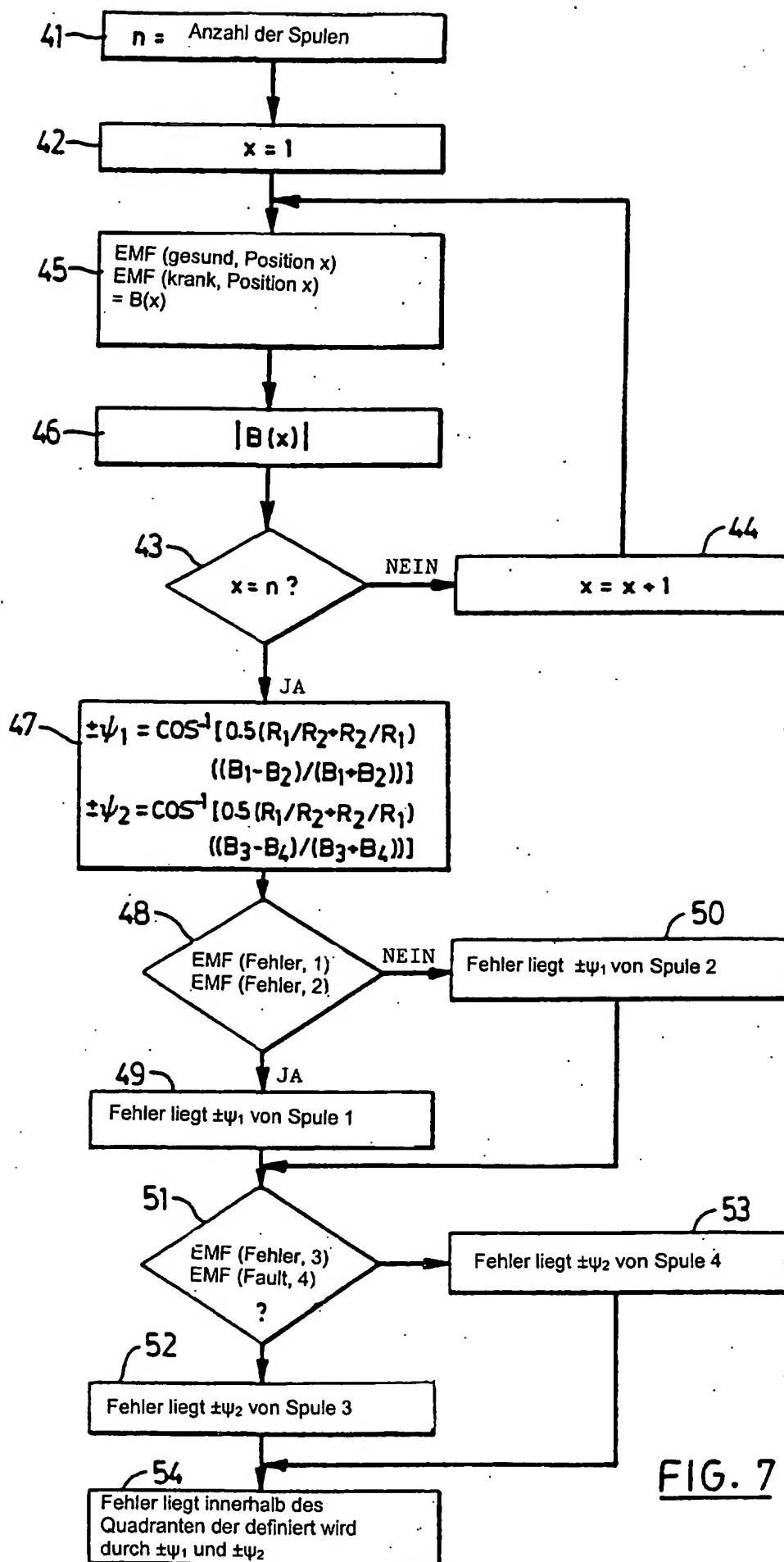


FIG. 7